组合权重 TOPSIS 模型评价黄土高原小流域淤地坝系风险

王琳,柯琴,李炎隆,武钰淼

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安)

摘　要:黄土高原小流域淤地坝系水毁案例频发,开展坝系风险评价意义重大。在构建小流域淤地坝系风险评价指标体系的基础上,提出层次分析法和熵权法相结合的主客观组合权重赋权方法,规避权重计算只考虑主、客观单方面因素的影响,提高权重确定的准确性;基于逼近理想解法(TOPSIS)构建小流域淤地坝系风险综合评价模型,实现多目标下的淤地坝系风险排序。将该评价模型应用于王茂沟小流域,得出其风险排序为:王茂沟 2 号单元 < 黄柏沟单元 < 埝堰沟单元 < 康和沟单元 < 关地沟单元 < 王塔沟单元,与实际相符,并亟需加强王塔沟坝系单元管护。采用 Spearman 等级相关系数检验法证明了组合权重 TOPSIS 模型评价结果的合理性。将灰色关联理论与组合权重 TOPSIS 模型进行同研究区坝系风险评价对比,得出组合权重 TOPSIS 模型在评价分辨水平和决策判断上更具优势。模型结果与实际情况基本相符,可为小流域淤地坝系风险评价提供技术参考。

关键词:淤地坝系;组合权重;TOPSIS 法;风险评价

中图分类号:S157　　**文献标志码**:A

Risk evaluation of check dam system in a small watershed of loess plateau using combined weight-TOPSIS method

WANG Lin, KE Qin, LI Yanlong, WU Yumiao

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

Abstract: The cases of check dam system damage in the small watershed in the Loess Plateau occur frequently, thus it is of great significance to carry out risk evaluation on the check dam system. Based on the risk evaluation index system of the check dam system in the small watershed, the subjective and objective combination weight empowerment method combining hierarchical analysis method and entropy weight method was put forward, which aims to avoid the shortcomings of considering only the subjective or the objective factors unilaterally and improve the accuracy of weight determination; The comprehensive risk evaluation model of the check dam system in the small watershed was constructed based on the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method, which can realize the risk ranking of

收稿日期:2021-09-21　　**修回日期**:2022-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51909214);国家自然科学基金重点资助项目(No. 41731289);中国科学院学部咨询资助项目(No. 2018-Z02-A-008);陕西省水利厅科技计划资助项目(No. 2021slkj-9)

通信作者:李炎隆,教授。E-mail:lylong2356@126.com

引用格式:王琳,柯琴,李炎隆,等. 组合权重 TOPSIS 模型评价黄土高原小流域淤地坝系风险[J]. 应用力学学报,2022,39(4):698-706.

WANG Lin, KE Qin, LI Yanlong, et al. Risk evaluation of check dam system in a small watershed of loess plateau using combined weight-TOPSIS method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(4): 698-706.

check dam system under multiple objectives. The evaluation model was applied to Wangmaogou small watershed, and the risk ranking comes out as: Wangmaogou 2# unit < Huangbogou unit < Nianyangou unit < Kanghegou unit < Guandigou unit < Wangtagou unit. The results are consistent with the actual situation. And accordingly, it is urgent to strengthen the management and protection of Wangtagou dam system unit. Furthermore, the evaluation results of the combined weight TOPSIS model were justified using the Spearman rank correlation coefficient test. The gray association theory and the proposed combined weight TOPSIS model were adopted to perform the risk evaluation comparison of the dam system in the same study area. The results show that the combined weight TOPSIS model has more advantages in the resolution level and decision judgment. The evaluation results are basically in accordance with the actual situation, which can provide technical reference for the risk evaluation of check dam system in small watershed.

Key words: check dam system; combined weight; TOPSIS method; risk evaluation

淤地坝是西北劳动人民在治理黄土高原水土流失的长期实践中创造出的一项行之有效的工程措施[1]，在减少入黄泥沙、拦泥造田、改善生态环境等方面产生了重要效益[2-4]。淤地坝坝体基本结构形式与土石坝较为相似，但大部分淤地坝工程采用竖井或涵洞泄水，泄洪能力不足[5]。近年来，因特大暴雨而引发淤地坝水毁的案例频发。2013 年 7 月，陕西延河流域遭遇持续强降雨导致受损淤地坝达 516 座[6]；2016 年 8 月，内蒙古达拉特旗发生特大暴雨，19 座淤地坝决口[7]；2017 年 7 月，陕西无定河特大水灾造成绥德县损毁淤地坝达 337 座[8]。淤地坝水毁问题对当地人民造成巨大生命和财产损失，开展淤地坝系风险综合评价、对小流域淤地坝系单元进行风险排序意义重大。

迄今为止，众多学者已对小流域淤地坝系的风险评价进行了研究。王永军[9]对黄河中游多沙粗沙区进行坝系工程安全分析，并用层次分析法进行了评价。赵宾华[10]运用层次分析法对王茂沟流域各淤地坝和淤地坝系防洪风险进行定量评价。王丹等[11]利用改进的层次分析方法对单坝、淤地坝单元以及流域坝系进行运行风险评价。杨瑞等[12]、袁水龙等[13]均采用层次分析法和逼近理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS)对王茂沟小流域开展安全评价。然而，现有研究大多基于少量指标数据分析，缺乏针对小流域淤地坝系相对完备的综合评价指标体系以及普适易用的评价方法。在评价指标数据有限的情况下对小流域淤地坝系风险排序时，若采用单一层次分析法确定指标权重，存在主观性较强、数据波动大、难以寻求其典型分布规律的缺陷[14]，无法客观评价各风险指标。若采用单一熵权法[15]，此方法只考虑影响淤地坝系风险的客观因素，忽视了专家的工程经验。目前，鲜有同时考虑主观经验因素和客观数据信息的小流域淤地坝系风险评价模型。

本研究拟构建包含洪灾、运行和经济的 3 个一级、10 个二级的小流域淤地坝系风险评价指标体系。为解决目前风险评价指标多采用主观权重确定的不足，建立组合权重 TOPSIS 风险评价模型。采用层次分析和熵权法建立组合权重指标，可获取评价指标的组合权重，再结合 TOPSIS 法以王茂沟小流域淤地坝系为例开展风险综合评价，以期为黄土高原小流域淤地坝系的安全防控提供技术参考。

1 小流域淤地坝系风险评价指标体系

1.1 淤地坝系风险评价指标体系构建

通过对历史上发生过的大量淤地坝及坝系水毁事件的情况调查[16-21]，发现常见水毁成因包括：①遭遇超标准暴雨洪水，早年的淤地坝设计标准低，当遭遇超过设计洪水标准的特大暴雨时水毁率可高达 64%，且调查发现距离暴雨中心越近的淤地坝损毁数量越多且更严重；②有效库容淤满，滞洪能力不足，中小型淤地坝多建于四、五十年前，经过长年淤积，库容已基本淤满，洪水极易引起漫顶垮坝；③泄放水工程设施不配套导致排水不畅，一方面，大多数淤地坝工程未设计泄放水设施，另一方面，部分淤地坝的泄洪设施为土质溢洪道，易发生冲刷下切而引发溃坝；④施工质量差，坝体填筑不实会引发不均匀沉降，导致坝体产生裂缝，土石部位结合不密实会出现集中渗水现象；⑤流域内缺乏控制性骨干工程，坝系布局不合理，易发生连锁溃坝事件；⑥后期管护薄弱，放水设施因年久失修会发生老化或淤堵，坝体无人管护会出现蚁穴、鼠洞等穿孔现象。

基于上述总结,考虑淤地坝具有滞洪拦泥和淤地造田的特殊作用,其水毁会对下游设施和经济作物造成淹没损失。本研究从坝系本身的防洪能力、外在的人为管护措施和水毁对下游造成的经济损失这3个角度开展淤地坝系风险评价。考虑指标数据来源的可靠与限制,并借鉴前人已建体系,构建影响淤地坝系安全的3个一级指标(洪灾、运行、经济)、10个二级指标的风险评价指标体系,见表1。

表1 淤地坝系风险评价指标

Tab. 1 Connotation of risk evaluation indexes of check dam system

一级指标	二级指标	指标含义	指标性质
洪灾风险(B1)	滞洪洪水(C1)	淤地坝控制面积内一定重现期暴雨的径流量减泄水建筑物的下泄量	负指标
	剩余库容(C2)	淤地坝抵御洪水能力的大小,剩余库容越大,抵御洪水的能力越强	正指标
	泄水设施(C3)	包含竖井、卧管及溢洪道的泄水能力	正指标
	坝体完好程度(C4)	淤地坝坝体发生损坏的程度	正指标
	坝系布局系数(C5)	坝系布局的合理性,布局越合理,系数越大	正指标
运行风险(B2)	日常管理(C6)	是否有相应部门对淤地坝进行管理、维护	正指标
	事故应急(C7)	是否有事故应急措施	正指标
	监测设施(C8)	是否有相应齐全并且能够正常运行的监测设施	正指标
经济风险(B3)	下游损失风险(C9)	下游是否建有道路、民房、工厂等,确定下游经济风险指标	负指标
	作物保收风险(C10)	坝系农作物允许淹没水深高于滞洪水深	负指标

1.2 淤地坝系风险评价指标赋值方法

在洪灾风险中,对评价指标C3进行赋值,当主坝有完整的溢洪道时取值为1,当溢洪道存在少量破损时取值为0.9,当采用卧管、竖井进行放水时取值为0.5,当其为闷葫芦坝或放水口被堵而无法放水时取值为0.1;对评价指标C4进行赋值,当主坝的坝体完好时取值为1,当存在细沟裂缝时取值为0.8,当存在细小洞穴时取值为0.2;对于评价指标C5,它反映了坝系布局的合理性,取值范围为0到1,大于0.65表示布局合理,小于0.4表示布局不合理,之间表示基本合理[10]。

在运行风险中,对评价指标C6进行赋值,当有相关部门对淤地坝进行管理、维护时取值为1,否则为0.1;对评价指标C7进行赋值,当存在事故应急措施时取值为1,否则为0;对评价指标C8进行赋值,当存在齐全且能够正常运行的监测设施时取值为1,否则为0.1。

在经济风险中,对评价指标C9进行赋值,当下游有重要居民建筑时,骨干坝坝系单元取值为1,支沟流域坝系单元取值为0.8;对评价指标C10进行赋值,其风险值与滞洪水深对应的洪水重现期相关[10]。

2 基于组合权重TOPSIS的小流域淤地坝系风险评价模型

2.1 风险评价模型技术路线

本研究根据坝系调查数据对风险评价指标体系中的10个指标进行定量赋值,为消除量纲影响,对赋值后的评价指标矩阵进行标准化处理。为合理反映各评价指标对坝系风险的影响程度大小,需计算各指标的权重向量,加权后的评价矩阵即为决策评价矩阵。采用层次分析法和熵权法建立组合权重指标,结合TOPSIS方法,开展小流域淤地坝系风险评价,技术路线如图1所示。

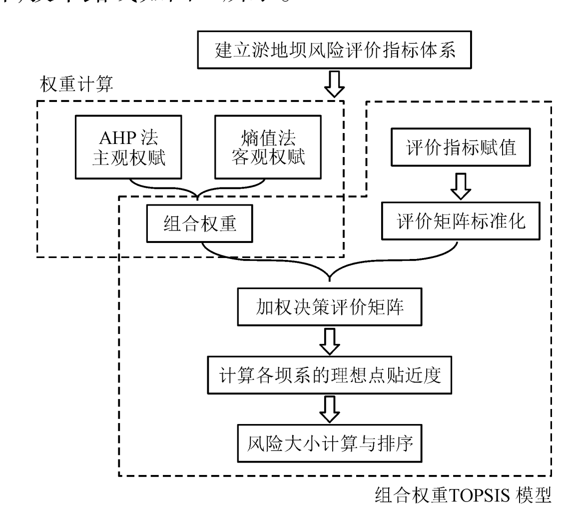


图1 风险评价模型技术路线图

Fig. 1 Technology road map of the risk evaluation model

2.2 评价指标权重

2.2.1 主观权重

采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)求取淤地坝系风险评价指标体系中各二级评价指标的主观权重值 $\omega_{主}$。AHP法计算简便灵活,具体步骤可参见文献[22]。

2.2.2 客观权重

采用熵权法确定评价指标的客观权重，计算步骤分为以下 4 步。

第 1 步：设一共有 m 个坝系，每个坝系有 n 个评价指标，构建判断矩阵，即

$$\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{mn} \quad (i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n) \tag{1}$$

其中 r_{ij} 为第 i 个坝系的第 j 个指标的值。

第 2 步：将判断矩阵进行归一化处理，得到归一化后的判断矩阵 $\boldsymbol{D}=(d_{ij})_{mn}$，

$$d_{ij}=\frac{r_{ij}-r_{\min}}{r_{\max}-r_{\min}} \tag{2}$$

其中：$r_{\max}$ 为同一指标不同坝系下的最优指标值；$r_{\min}$ 为同一指标不同坝系下的最劣指标值。

第 3 步：对于有 m 个坝系、n 个指标的情况，可以确定评价指标的熵为：

$$S_j=-\frac{\sum_{i=1}^{m} f_{ij}\ln f_{ij}}{\ln m} \quad (i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

其中，$f_{ij}=(1+d_{ij})/\sum_{i=1}^{m}(1+d_{ij})$。

第 4 步：评价指标的熵权向量 $\boldsymbol{W}$ 为

$$\boldsymbol{W}=(\omega_j)_{1\times n} \tag{4}$$

其中 ω_j 为第 j 个评价指标的熵权，且

$$\omega_j=\frac{1-S_j}{n-\sum_{j=1}^{n} S_j} \tag{5}$$

2.2.3 组合权重

综合主观赋权 $\omega_{主j}$ 与客观赋权 $\omega_{客j}$，得到组合权重 ω_j，即

$$\omega_j=\frac{(\omega_{主j}\cdot\omega_{客j})^{0.5}}{\sum_{j=1}^{m}(\omega_{主j}\cdot\omega_{客j})^{0.5}} \quad (j=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

2.3 TOPSIS 评价方法

评价步骤分为以下 5 步[23]。

第 1 步：指标数据的标准化处理。

针对有 m 个坝系、n 个评价指标的情况，设初始评价矩阵为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

对数据进行标化处理，对于越大越优的正指标，计算公式为

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_{ij})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{8}$$

对于越小越优的负指标，计算公式为

$$p_{ij}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{9}$$

最终得到标准化矩阵为 $\boldsymbol{P}=[p_{ij}]_{m\times n}$。

第 2 步：建立加权决策评价矩阵。

考虑各评价指标权重后的加权规范化矩阵为

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{P}\cdot\boldsymbol{W}=[v_{ij}]_{m\times n} \tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{W}$ 为评价指标权重向量，本研究采用主客观组合权重，由式(6)计算得到。

第 3 步：确定正、负理想解 $\boldsymbol{V}^+$ 和 $\boldsymbol{V}^-$。

$$\boldsymbol{V}^+=\{\max(v_{ij})\mid i=1,2,\cdots,m\}=\{v_1^+,v_2^+,\cdots,v_n^+\} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{V}^-=\{\min(v_{ij})\mid i=1,2,\cdots,m\}=\{v_1^-,v_2^-,\cdots,v_n^-\} \tag{12}$$

第 4 步：计算距离。

评价指标到正、负理想解 $\boldsymbol{V}^+$ 和 $\boldsymbol{V}^-$ 的欧式距离为 $\boldsymbol{D}_i^+$ 和 $\boldsymbol{D}_i^-$，即

$$\boldsymbol{D}_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_j^+-v_{ij})^2} \quad (i=1,2,\cdots,m) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{D}_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{ij}-v_j^-)^2} \quad (i=1,2,\cdots,m) \tag{14}$$

其中：v_j^+ 为评价指标 j 的正理想点；v_j^- 为评价指标 j 的负理想点。评价指标离正理想点越近、离负理想点越远，指标越优，风险越小。

第 5 步：相对贴近度计算与排序。

用相对贴近度 T_i 表示评价值与最优值的程度，其值越大表示越靠近最优值，即风险越小。计算式如下。

$$T_i=\frac{\boldsymbol{D}_i^-}{\boldsymbol{D}_i^++\boldsymbol{D}_i^-} \quad (i=1,2,\cdots,m) \tag{15}$$

计算各坝系的贴近度并进行排序，获取各坝系间的相对风险大小。

3 小流域淤地坝系风险评价——以王茂沟流域为例

3.1 王茂沟流域概况

王茂沟位于陕西省榆林市绥德县，是无定河中

游左岸韭园沟的一条二级支沟，地理位置为东经940 ~ 1 188 m，流域面积为5.97 km^2，主沟长3.75 km，地面坡度一般在20°以上。流域降雨较少并且分布不均，多年平均降水量为513 mm，其汛期降雨占到年降水总量的70%以上[24]。2012年和2017年，其流域淤地坝系单元均由于暴雨遭受不同程度损毁，亟需开展风险分析。根据黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站数据，至2016年底，王茂沟流域共有淤地坝23座，其中骨干坝2座，中型坝7座，小型坝14座[25]。以2012年7月15日王茂沟流域遭受罕见暴雨袭击后溃决的淤地坝为例开展研究。剔除掉2012年之前已经溃决及淤满的淤地坝后，选取其中18座淤地坝进行分析，如图2所示。本研究将王茂沟流域坝系分为关地沟单元、王塔沟单元、王茂沟2号单元、埝堰沟单元、康和沟单元和黄柏沟单元。

3.2 确定指标权重

淤地坝系风险评价指标体系如表1所示，采用3个一级指标、10个二级指标，王茂沟流域各坝系单元遭遇百年一遇洪水时，其风险的部分评价指标实际数据汇总见表2[10,13]。

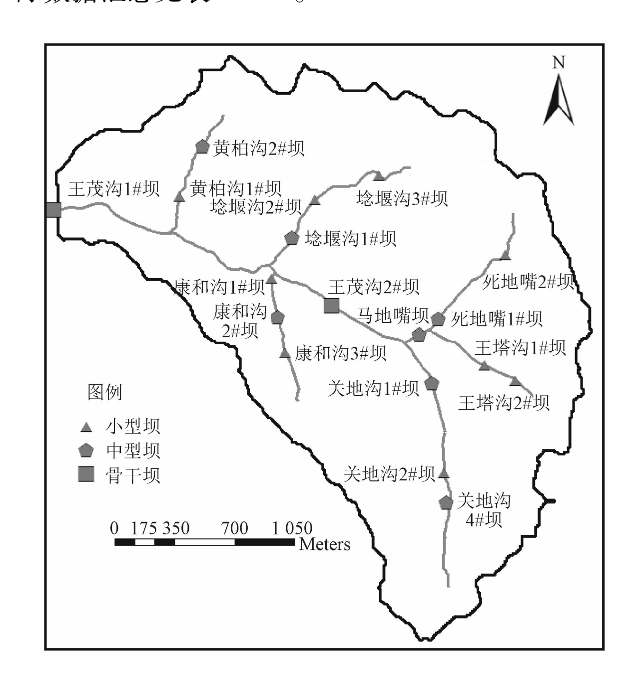


图2 王茂沟流域选取淤地坝布置图[26]

Fig. 2 Check dam distribution in Wangmaogou Basin[26]

表2 评价指标实际数据汇总表

Tab. 2 Summary table of evaluation indexes

淤地坝	滞洪洪水/($10^4 m^3$)	剩余库容/($10^4 m^3$)	泄水设施	坝体完好程度	日常管理	应急措施	监测设施
关地沟单元	6.57	43.29	溢洪道	微小洞穴	无	无	无
王塔沟单元	4.26	5.23	无	完好	无	无	无
王茂沟2#单元	5.53	64.38	竖井	完好	有	有	有
埝堰沟单元	4.93	32.76	卧管	完好	无	无	无
康和沟单元	2.28	9.67	卧管已堵	细沟、裂缝	无	无	无
黄柏沟单元	1.48	3.85	竖井	完好	无	无	无

评价指标中滞洪洪水、下游损失风险和作物保收风险为负指标，其余均为正指标。坝系布局系数、下游损失风险和作物保收风险的赋值结果参考文献[10]，由赋值得到的初始评价矩阵经标准化处理后得到矩阵 $\boldsymbol{P}$，即

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} 0.000 & 0.652 & 1.000 & 0.000 & 0.178 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.030 \\ 0.454 & 0.023 & 0.000 & 1.000 & 0.089 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ 0.204 & 1.000 & 0.444 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.000 & 0.020 \\ 0.322 & 0.478 & 0.444 & 1.000 & 0.333 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.677 \\ 0.843 & 0.096 & 0.000 & 0.750 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.687 \\ 1.000 & 0.000 & 0.444 & 1.000 & 0.267 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}$$

根据标度确定原则构造满足一致性要求的判断矩阵，该判断矩阵的特征向量经标准化处理得到层次分析法主观权重向量；再由式(4)和式(5)计算每个评价指标的熵权即客观权重；将主观权重向量和客观权重向量代入式(6)得到组合权重向量。分别采用层次分析法、熵权法和组合权重法计算得到评价指标权重向量，结果如图3所示。组合权重值位于主客观权重值之间，表明了组合权重的信息集成作用。

3.3 风险排序

对标准化评价矩阵 $\boldsymbol{P}$ 加权处理，得到加权决策评价矩阵 $\boldsymbol{V}$，即

$$V = P \cdot W = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.057 & 0.092 & 0.000 & 0.012 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.101 & 0.004 \\ 0.044 & 0.002 & 0.000 & 0.058 & 0.006 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.101 & 0.000 \\ 0.020 & 0.088 & 0.041 & 0.058 & 0.068 & 0.116 & 0.127 & 0.118 & 0.000 & 0.003 \\ 0.031 & 0.042 & 0.041 & 0.058 & 0.023 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.101 & 0.091 \\ 0.082 & 0.008 & 0.000 & 0.043 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.101 & 0.092 \\ 0.097 & 0.000 & 0.041 & 0.058 & 0.018 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.101 & 0.134 \end{bmatrix}$$

其中 W 为组合权重。

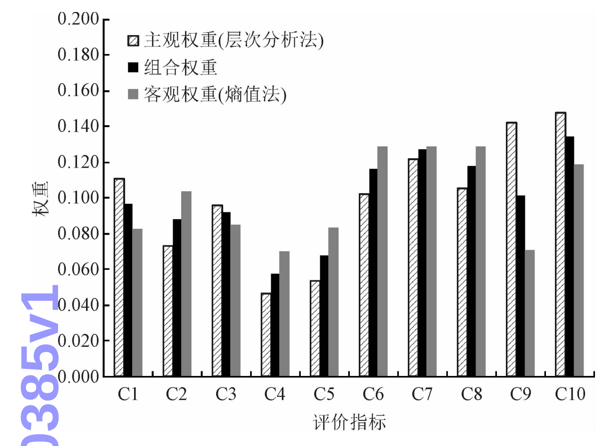


图 3 王茂沟流域淤地坝系风险评价指标权重

Fig. 3 The weight of check dam system risk evaluation index in Wangmaogou Basin

由式(11)和式(12)计算正、负理想解 V^+ 和 V^- 分别为

$V^+ = [0.097 \quad 0.088 \quad 0.092 \quad 0.058 \quad 0.068 \quad 0.116 \quad 0.127 \quad 0.118 \quad 0.101 \quad 0.134]$,

$V^- = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$

由式(13)和式(14)计算各坝系单元到正、负理想点的距离 D^+ 和 D^- 为

$D^+ = [0.278 \quad 0.290 \quad 0.190 \quad 0.238 \quad 0.255 \quad 0.238]$,

$D^- = [0.149 \quad 0.125 \quad 0.248 \quad 0.164 \quad 0.166 \quad 0.208]$

采用组合权重 TOPSIS 模型计算各坝系单元的相对贴近度 T 为

$T = [0.349 \quad 0.301 \quad 0.566 \quad 0.408 \quad 0.393 \quad 0.466]$

相对贴近度越大表示风险越小,采用组合权重 TOPSIS 风险评价模型对王茂沟小流域坝系单元的风险排序结果为:王茂沟 2 号单元 < 黄柏沟单元 < 埝堰沟单元 < 康和沟单元 < 关地沟单元 < 王塔沟单元,如图 4 所示。对图 4 中的相对贴近度拟合,拟合后的决定系数 R^2 为 0.944,表明组合权重 TOPSIS 模型计算的评价数值分布均匀合理。

由图 4 可知,王塔沟单元风险最大。王塔沟单元位于王茂沟流域支沟,风险大于骨干坝王茂沟 2 号坝。在黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站王茂沟小流域开展实地调查发现,王塔沟单元坝系王塔沟 1#坝和 2#坝的坝高分别为 9 m 和 13 m,坝顶宽 3.6 m 和 4 m,无任何泄水设施,排水不畅,淤积底面距离坝顶分别为 0.1 m 和 4.7 m,剩余库容较小,风险较高,因此需加紧支沟淤地坝的泄水建筑物建设。

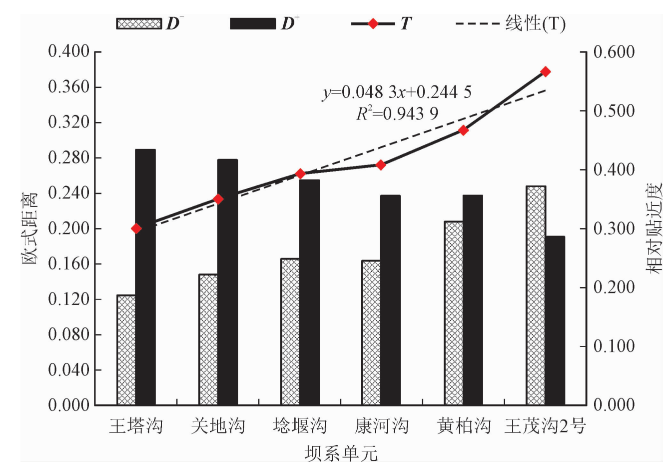


图 4 王茂沟流域坝系单元欧氏距离相对贴近度

Fig. 4 Euclidean distance and relative closeness degree of check dam system units in Wangmaogou Basin

流域骨干坝王茂沟 2 号单元的建设标准较高,风险最低。据绥德水保站实测资料显示,2012 年 7.15 暴雨袭击王茂沟流域,共有 8 座坝体发生溃决,王塔沟单元坝系王塔沟 1#坝和 2#坝发生溃坝[26],王塔沟 1#坝溃口尺寸宽为 1 m,2#坝溃口宽 11.2 m,深 4.6 m。王茂沟 2 号骨干坝未发生溃决。风险排序结果与实际情况相符。

分别采用组合权重、AHP 法、熵权法结合 TOPSIS 方法开展小流域淤地坝系风险评价对比分析,各坝系单元的理想点相对贴近度与风险排序结果如表 3 所示。采用 Spearman 等级相关系数检验法对不同风险排序结果的关联度进行检验,组合权重 TOPSIS 模型排序结果与主、客观权重 TOPSIS 模型排序结果的相关系数分别为 0.943 和 1.000,关联度极高,评价结果具有高度一致性,表明组合权重 TOPSIS 模型

实现了主观经验判断与客观数据信息的有效集成；主、客观权重 TOPSIS 模型排序结果的相关系数为 0.943，表明主观判断与客观信息之间的差异性。此外，分别采用组合权重 TOPSIS 模型与灰色关联理论[27]对同研究区坝系风险开展对比评价，结果如表 3 所示。两种方法在该研究问题上均操作简单，计算迅速。由组合权重 TOPSIS 模型和灰色关联分析得到的排序结果一致，表明本研究提出的风险评价模型合理、可靠。对经过排序后的贴进度值进行一次线性拟合，认为其坡度值在一定程度上能说明排序结果的整体分辨水平。经计算，组合权重 TOPSIS 模型与灰色关联分析模型的贴进度值的线性拟合函数分别为 $y = 0.048\,3x + 0.244\,5$ 和 $y = 0.027x + 0.09$，坡度值分别为 0.048 3 和 0.027 0。因此组合权重 TOPSIS 模型在评价分辨水平上更优，更利于决策判断。

本研究模型中主、客观权重对组合权重的贡献程度相等。考虑到可以通过调整主客观权重的贡献程度来进行权重的进一步优化。经过后续计算，发现当采用不同的主客观权重占比，如 0.3∶0.7、0.4∶0.6、0.5∶0.5、0.6∶0.4、0.7∶0.3 时，风险排序结果一致，对排序后的理想点贴进度值进行一次线性拟合后，坡度分别为 0.040、0.043 2、0.048 3、0.049 7、0.052 9。主客观权重比为 0.3∶0.7 时，各个单元的理想点贴进度值较为分散，分辨水平高，便于决策。但考虑到优化程度不高，为方便计算，仍然以主、客观权重的贡献程度相等来计算组合权重。

表 3　贴近度及风险排序结果

Tab. 3　Closeness degree and risk ranking result

坝系单元名称	组合权重 TOPSIS		AHP-TOPSIS		熵权法-TOPSIS		灰色关联分析	
	贴近度	风险排序	贴近度	风险排序	贴近度	风险排序	评价值	风险排序
关地沟单元	0.349	2	0.396	2	0.315	2	0.154	2
王塔沟单元	0.301	1	0.360	1	0.262	1	0.136	1
王茂沟 2#单元	0.566	6	0.493	5	0.632	6	0.303	6
埝堰沟单元	0.408	4	0.462	4	0.337	3	0.170	4
康和沟单元	0.393	3	0.461	3	0.370	4	0.158	3
黄柏沟单元	0.466	5	0.530	6	0.412	5	0.187	5

4　结　论

1）权重的确定对小流域淤地坝风险排序结果影响显著。建立黄土高原小流域淤地坝系风险评价指标体系，从洪灾、运行和经济风险 3 个方面确定影响风险评价的 3 个一级指标、10 个二级指标，该体系为后续小流域淤地坝系安全评价系统的建立提供理论依据。根据层次分析法（AHP）和熵权法求得风险评价指标的主、客观权重，获取其组合权重。该方法规避了权重计算仅仅只考虑主、客观单方面因素的影响，确保了评价指标的客观、公正性。

2）建立组合权重 TOPSIS 的黄土高原小流域淤地坝系风险评价模型，为黄土高原小流域淤地坝系风险评价方法提供参考与指导。结合主客观组合权重，运用 TOPSIS 法可获取各坝系单元的风险大小及风险排序。将其应用于王茂沟小流域，发现当遭遇百年一遇暴雨时风险排序结果为：王茂沟 2 号单元 < 黄柏沟单元 < 埝堰沟单元 < 康和沟单元 < 关地沟单元 < 王塔沟单元，基本符合实际情况，并建议加强对王塔沟单元的管护。

3）分别运用组合权重法、AHP 法、熵权法结合 TOPSIS 针对小流域淤地坝系风险开展对比评价，采用 Spearman 等级相关系数检验法对由 3 种权重计算得到的排序结果进行相关性检验，相关系数均不小于 0.943，表明组合权重 TOPSIS 模型实现了主观经验判断与客观数据信息的有效集成，概念清晰，结果合理。

4）在实例中，分别采用组合权重 TOPSIS 模型与灰色关联理论开展风险评价对比，结果表明，组合权重 TOPSIS 模型和灰色关联分析得到的风险排序结果一致，两者的评价值线性坡度分别为 0.048 3 和 0.027 0，故组合权重 TOPSIS 模型在评价分辨水平和决策判断上更具优势，更适用于风险评价。

参考文献：

[1] XU X Z, ZHANG H W, ZHANG O Y. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China[J]. Environmental science & policy, 2004, 7(2): 79-86.

[2] 孙从建，张文强，李新功，等. 基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 165-172.
SUN Congjian, ZHANG Wenqiang, LI Xingong, et al. Evaluation of ecological effect of gully region of Loess plateau based on remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(12): 165-172 (in Chinese).

[3] 冉大川，姚文艺，李占斌，等. 不同库容配置比例淤地坝的减沙效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 154-162.
RAN Dachuan, YAO Wenyi, LI Zhanbin, et al. Effects of warping dams of different storage capacity configuration proportion on reducing sediment base[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2013, 29(12): 154-162 (in Chinese).

[4] PREVIATI M, CANONE D, BEVILACQUA I, et al. Evaluation of wood degradation for timber check dams using time domain reflectometry water content measurements[J]. Ecological engineering, 2012, 44: 259-268.

[5] 魏霞，李占斌，沈冰，等. 陕北子洲县典型淤地坝淤积过程和降雨关系的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 80-84.
WEI Xia, LI Zhanbin, SHEN Bing, et al. Depositing process of check dams on loess plateau in northern Shaanxi province[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 80-84 (in Chinese).

[6] 魏艳红，王志杰，何忠，等. 延河流域 2013 年 7 月连续暴雨下淤地坝毁坏情况调查与评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 250-255.
WEI Yanhong, WANG Zhijie, HE Zhong, et al. Investigation and evaluation on check dams damaged condition under continuous rainstorm in Yanhe river basin in July 2013[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2015, 35(3): 250-255 (in Chinese).

[7] 汪自力，张宝森，刘红珍，等. 2016 年达拉特旗淤地坝水毁原因及拦沙效果[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 1-6.
WANG Zili, ZHANG Baosen, LIU Hongzhen, et al. Damage causes and sand-blocking effects of warping dams in Dalat Banner in 2016[J]. Advances in science and technology of water resources, 2019, 39(4): 1-6 (in Chinese).

[8] 党维勤，郝鲁东，高健健，等. 基于“7·26”暴雨洪水灾害的淤地坝作用分析与思考[J]. 中国水利, 2019(8): 52-55.
DANG Weiqin, HAO Ludong, GAO Jianjian, et al. Roles of silt retention dam in rainstorm flood disaster on July[J]. China water resources, 2019(8): 52-55 (in Chinese).

[9] 王永军. 黄河中游多沙粗沙区坝系工程安全评价方法研究[D]. 北京：北京林业大学, 2009.

[10] 赵宾华. 淤地坝系溃坝机理与防洪风险评价研究[D]. 西安：西安理工大学, 2015.

[11] 王丹，哈玉玲，李占斌，等. 宁夏典型流域淤地坝系运行风险评价[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(3): 17-25.
WANG Dan, HA Yuling, LI Zhanbin, et al. Evaluation on the operation risk of dam system in the typical watersheds of Ningxia[J]. Science of soil and water conservation, 2017, 15(3): 17-25 (in Chinese).

[12] 杨瑞，李子龙，王丹，等. 黄土高原小流域淤地坝系安全评价[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 41-45.
YANG Rui, LI Zilong, WANG Dan, et al. Evaluation on warping dam system safety in small watershed of loess plateau[J]. Journal of Yanan University(natural science edition), 2018, 37(1): 41-45 (in Chinese).

[13] 袁水龙，张卫华，王湛. 黄土丘陵区小流域淤地坝系安全评价体系研究[J]. 土地开发工程研究, 2018, 3(5): 40-45, 50.
YUAN Shuilong, ZHANG Weihua, WANG Zhan. Study on safety evaluation system of warp land dam system in small watershed in loess hilly region[J]. Land development and engineering research, 2018, 3(5): 40-45, 50 (in Chinese).

[14] 信桂新，杨朝现，杨庆媛，等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型高标准基本农田建设后效应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 238-249.
XIN Guixin, YANG Chaoxian, YANG Qingyuan, et al. Post-evaluation of well-facilitied capital farmland construction based on entropy weight method and improved TOPSIS model[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(1): 238-249 (in Chinese).

[15] 李峰，孙波，王轩，等. 层次分析法结合熵权法评估农村屋顶光伏系统电能质量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 159-166.
LI Feng, SUN Bo, WANG Xuan, et al. Power quality assessment for rural rooftop photovoltaic access system based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(11): 159-166 (in Chinese).

[16] 陕西省水保局陕北淤地坝调查组. 1994 年陕北地区淤地坝水毁情况调查[J]. 人民黄河, 1995(1): 15-18, 61.
Silt arrester investigation team of Shaanxi water and soil conservation bureau. Investigation of silt arrester failures in North Shaanxi Province in 1994[J]. Yellow river, 1995(1): 15-18, 61 (in Chinese).

[17] 李靖，张金柱，王晓. 20 世纪 70 年代淤地坝水毁灾害原因分析[J]. 中国水利, 2003(17): 55-56, 32.
LI Jing, ZHANG Jinzhu, WANG Xiao. Viewing silt retention dam constructions by looking at rainstorm in the middle reaches of the Yellow River in the 1970s[J]. China water resources, 2003(17): 55-56, 32 (in Chinese).

[18] 王允升，王英顺. 黄河中游地区 1994 年暴雨洪水淤地坝水毁情况和拦淤作用调查[J]. 中国水土保持, 1995(8): 23-26, 62.
WANG Yunsheng, WANG Yingshun. Situation of silt arresters de-

stroyed by storm flood in 1994 and investigation on effect of retaining silt in middle Yellow River Region[J]. Soil and water conservation in China,1995(8):23-26,62(in Chinese).

[19] 李占斌. 小流域淤地坝坝系防洪风险评价技术[M]. 北京:科学出版社,2018.

[20] 刘晓燕,高云飞,王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河,2017,39(4):1-5,10.
LIU Xiaoyan,GAO Yunfei,WANG Fugui. Quantity and distribution of warping dams that still have sediment retaining ability in the loess plateau[J]. Yellow river,2017,39(4):1-5,10(in Chinese).

[21] 王楠,陈一先,白雷超,等. 陕北子洲县"7·26"特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查[J]. 水土保持通报,2017,37(4):338-344.
WANG Nan,CHEN Yixian,BAI Leichao,et al. Investigation on soil erosion in small watersheds under "7·26" extreme rainstorm in Zizhou County,Northern Shaanxi province[J]. Bulletin of soil and water conservation,2017,37(4):338-344 (in Chinese).

[22] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
DENG Xue,LI Jiaming,ZENG Haojian,et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in practice and theory,2012,42(7):93-100(in Chinese).

[23] HWANG C L,YOON K. Methods for multiple attribute decision making[M]. Heidelberg:Springer Group,1981.

[24] 周玉珍,郭天恩,杨俊杰. 晋西淤地坝水毁调查分析与防治对策[J]. 人民黄河,1996(7):51-52,54.
ZHOU Yuzhen,GUO Tianen,YANG Junjie. Investigation and analysis into flood-induced failures of the check dams in western Shanxi and corresponding countermeasures[J]. Yellow River,1996(7):51-52,54 (in Chinese).

[25] 袁水龙,李占斌,李鹏,等. 基于 MIKE 模型的不同淤地坝型组合情景对小流域侵蚀动力和输沙量的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(4):30-36.
YUAN Shuilong, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Effect of different check dam type combined scenarios on the erosion dynamics and sediment transport in small watershed base on the MIKE model [J]. Journal of soil and water conservation,2019,33(4):30-36 (in Chinese).

[26] 张泽宇. 淤地坝放水建筑物水流特性与溃坝洪水过程模拟研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.

[27] 王子龙,常广义,姜秋香,等. 灰色关联及非线性规划法构建传递函数估算黑土水力参数[J]. 农业工程学报,2019,35(10):60-68.
WANG Zilong,CHANG Guangyi,JIANG Qiuxiang,et al. Constructing pedo-transfer functions based on grey relational and nonlinear programming to estimate hydraulic parameters in black soil[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2019,35(10):60-68(in Chinese).

(编辑　黄崇亚)

(上接第 689 页)

[6] 冯胜洋. 深厚软土区段高速铁路桥梁桩基工后沉降特性研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[7] 徐庆国. 京沪高速铁路群桩基础沉降变形特性研究[D]. 长沙:中南大学,2013.

[8] TAN F Y,HU H B,LÜ W Z,et al. Study on bearing performance of mixed pile on saturated silty sand ground[J]. Japanese geotechnical society special publication,2015,1(6):41-46.

[9] GIANNOPOULOS K, ZDRAVKOVIC L, POTTS D. A numerical study on the effects of time on the axial load capacity of piles in soft clays[M]//Numerical Methods in Geotechnical Engineering. Boca Raton,USA:CRC Press,2000:595-600.

[10] ZHANG L P,SHEN Y B,WANG D D. Research on bored bearing characteristics in Xi'an[J]. MATEC web of conferences,2015,22(11):05025.

[11] 王荣勇,柳林齐,王颖轶,等. 基于虚拟柱状等效模型的桩基沉降位移计算方法[J]. 上海交通大学学报,2021,55(9):1126-1133.
WANG Rongyong, LIU Lingqi, WANG Yingyi, et al. Calculation method of pile foundation settlement displacement based on virtual column equivalent model[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2021,55(9):1126-1133(in Chinese).

[12] 柳林齐,王颖轶. 软土地层桩基承载模式及其施工因素的相关性[J]. 中国市政工程,2021(3):105-111,129-130.
LIU Linqi,WANG Yingyi. Bearing mode of pile foundation in soft soil layer & the correlation of its construction factors[J]. China municipal engineering,2021(3):105-111,129-130(in Chinese).

(编辑　黄崇亚)